

韩涛, 赵志鹏, 王莹莹. 施肥对苏丹草修复石油污染土壤的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 86–92.

HAN Tao, ZHAO Zhi-peng, WANG Ying-ying. Effect of fertilization on remediation of petroleum contaminated soil by *Sudangrass* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 86–92.

施肥对苏丹草修复石油污染土壤的影响

韩涛, 赵志鹏, 王莹莹*

(南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了苏丹草修复石油污染土壤的效果, 在有、无氮磷钾肥的条件下, 对苏丹草的生长发育和石油的组分进行了分析。结果表明, 经过 90 d 的修复, 施肥处理的石油烃去除率比无施肥处理的对照高 10.31%; 苏丹草的株高、地上干重和地下干重也得到了显著提高, 而叶绿素 a/b 和叶绿素 a/类胡萝卜素均有所降低; 芳烃(16 种多环芳烃)的去除率和烷烃(C8~C40)的去除率分别提高了 7.39% 和 6.44%。不论是对照还是施肥处理, 烷烃的去除效果均优于芳烃。

关键词: 氮磷钾肥; 苏丹草; 石油烃; 芳烃; 烷烃

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)01-0086-07 doi:10.11654/jaes.2016.01.012

Effect of fertilization on remediation of petroleum contaminated soil by *Sudangrass*

HAN Tao, ZHAO Zhi-peng, WANG Ying-ying*

(Ministry of Education Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: In the present study, the effect of fertilization on the remediation of petroleum contaminated soil by *Sudangrass* was investigated in a pot experiment. Growth of *Sudangrass* and removal and components of petroleum hydrocarbons were examined. Results showed that growing *Sudangrass* significantly decreased petroleum hydrocarbon content in the soil. After 90 day of the experiment, the removal rate of petroleum hydrocarbons was 10.31% greater under fertilization (up to 54.20%) than under the un-fertilized control. Fertilization also promoted the growth of *Sudangrass*. The shoot height (up to 23.07 cm), shoot dry weight (up to 0.45 g), and root dry weight (up to 0.08 g) of *Sudangrass* under fertilization were all significantly higher than those under the un-fertilized control. The removal rates of aromatic hydrocarbons (16 PAHs, up to 21.35%) and alkanes (C8~C40, up to 51.94%) were respectively 7.39% and 6.44% greater under fertilized conditions than under the control. Significant differences were observed in the removal rates between alkanes and aromatic hydrocarbons. The removal efficiencies of alkanes were greater than those of aromatic hydrocarbons under both fertilized and control conditions. Phenanthrene, pyrene and benzo[a] anthracene were the main components of the aromatic hydrocarbons, representing more than 80% of the total aromatic hydrocarbons in the soil. Our results demonstrate that fertilization could promote the remediation of petroleum contaminated soil by *Sudangrass*.

Keywords: N, P and K fertilizer; *Sudangrass*; petroleum hydrocarbons; aromatic hydrocarbons; alkanes

石油作为重要的能源和化工原料, 在全球的需求不断上升^[1]。在开采、冶炼、储存和运输的过程中, 由于工艺水平和处理技术的限制, 经常发生石油泄漏和废油废渣抛洒, 导致严重的土壤污染^[2-3]。据统计, 我国每

年的石油产量已经超过了 1.0×10^{11} kg, 每年因开采石油而污染的土壤达到了 1.0×10^8 kg。石油由复杂的有机混合物组成, 包括烷烃、烯烃、芳烃、杂环芳烃等多组分复杂分子结构^[4], 其中许多物质可干扰动物内分泌系统, 影响生物正常繁衍, 干扰人类的免疫功能, 具有致癌、致畸和致基因突变的作用, 严重威胁着人类的健康和环境的质量^[3-4]。因此, 修复石油污染的土壤已经受到了国内外的广泛关注^[5]。

收稿日期: 2015-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(31270545)

作者简介: 韩涛(1988—), 男, 博士研究生, 从事石油污染修复研究。

E-mail: hantao402131837@126.com

* 通信作者: 王莹莹 E-mail: wangyy@nankai.edu.cn

在减少石油污染对环境的不良影响方面,“绿色”技术已经取得了越来越多的成果^[6]。同时,植物在可行的清洁技术中的作用,也受到越来越多的关注^[6-8]。植物通过提供养分给微生物、改善土壤的理化性质等途径来降解、转移、同化和代谢环境中的有害污染物^[7,9]。反之,微生物代谢也为植物的生长发育提供了养分,使植物对污染物的耐受性得到了提高^[10]。

但是在修复的过程中,由于土壤本身物理结构不佳、微生物数量及养分含量低等因素,通常采用添加肥料来调节养分,促进石油污染物的降解^[5,11]。同时,肥料还提供了电子受体来加速污染物的去除^[12]。本文以苏丹草为试验对象,研究了肥料施用对苏丹草修复石油污染土壤的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

无污染土壤采自天津市西青区的农田,经风干过筛后,将溶于石油醚中的脱水原油均匀喷洒在土壤中,添加量为 $10\ 000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干土,避光通风放置两周后使用。

1.2 试验设计

本试验为室内盆栽试验,对照未添加肥料,处理添加氮磷钾复合肥,各处理3个重复。根据土壤的理化性质,参考谢勇等^[13]和李小坤等^[14]的报道,得出一个适中的施肥量, $80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ N}$ 、 $50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ P}_2\text{O}_5$ 、 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ K}_2\text{O}$ 。将污染土壤装盆,每盆 1500 g ,含水量为田间持水量的60%,将培养箱中催芽1周后的苏丹草幼苗移栽到土壤中,每个花盆10棵。试验温度在 $18\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,每天 16 h 光照。90 d后收取植物地上、地下部分及土壤,对相应指标进行测量及分析。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤理化性质的测定

电位计法测定 pH 值:按土水比为 $1:2.5$ 的比例将土壤与水混合,间歇搅拌 30 min ,再放置 30 min ,用校准后的电位计测定土壤的 pH 值。

灼烧法测定有机质含量:将 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干的土壤样品冷却后称重,放置马弗炉中 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 灼烧 2 h ,冷却后再称重,通过计算得到有机质的含量。

凯氏定氮法测定全氮含量:称取烘干的土壤样品 0.1000 g 于消化管中,加入 10 mL 浓硫酸和1片催化片,在 $390\text{ }^\circ\text{C}$ 下消化 1.5 h ,冷却后用全自动凯氏定氮仪测定全氮含量。

火焰光度计法测定全钾含量:称取烘干的土壤样

品 0.2500 g 于银坩埚中,加入几滴无水乙醇和 2.0 g 固体氢氧化钠(平铺于土样表面);将坩埚放入马弗炉内,由低温升温至 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 保持 15 min ,冷却后加水 10 mL ,并加热至 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,待熔块溶解后再煮 5 min ,转入 50 mL 容量瓶中;用少量 $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸溶液清洗数次,也转入到容量瓶中使其体积约为 40 mL ,再加 50% 盐酸溶液 5 滴和 $4.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸溶液 5 mL ,用水定容,过滤;然后用火焰光度计测定,并通过测定配制的钾元素标准系列溶液绘制标线,查得其浓度。

电感耦合等离子体发射光谱法测定剩余元素含量:称取烘干的土壤样品 0.1000 g 于消化管中,加入浓硝酸 5 mL 、双氧水 3 mL 和氢氟酸 2 mL ,适当混合后放入微波消解仪内,由低温升温至 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 保持 10 min ,再升温至 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 保持 20 min ,最后升温到 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 保持 30 min ;冷却后取出消化管,放置加热板上加热至剩绿豆大小的溶液时,停止加热,冷却后用 2% 的稀硝酸定容;用电感耦合等离子体发射光谱仪测定,并通过测定配制的混合元素标准系列溶液绘制各元素的标线,查得各元素的浓度。

1.3.2 光合色素的测定

取 90 d 的苏丹草叶片,混匀后称取 0.5 g 放入 10 mL 光合色素提取液中(无水乙醇:丙酮:水= $45:45:10$)。避光低温保存一周后,用分光光度计测定溶液在 663 、 645 、 470 nm 波长下的吸收值^[15-16],然后计算色素的含量。

1.3.3 土壤中石油烃的测定

称取过 100 目筛的风干土 5.0 g 于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 二氯甲烷超声萃取 15 min ,后 $4000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min ,将上清液转移至锥形瓶后,再加入 20 mL 二氯甲烷继续超声,共萃取 3 次。将其放入通风橱中,待二氯甲烷挥发完全后,对锥形瓶称重,利用差量法计算石油烃的含量。

1.3.4 石油烃组分的分离

将活化后的硅胶、中性氧化铝、无水硫酸钠溶于正己烷后,自下而上依次装入带有正己烷的直径为 1 cm 、长为 30 cm 的玻璃柱中,三种物质的长度分别为 12 、 6 、 1 cm 。向称重后的锥形瓶中加入少量正己烷溶液,将其转移到玻璃柱中,用 20 mL 的正己烷洗脱得到烷烃后,再用 70 mL 的混合液(正己烷:二氯甲烷= $1:1$)洗脱得到芳烃。将得到的烷烃和芳烃溶液在通风橱中风干。

1.3.5 芳烃和烷烃组分的测定

本试验采用 Agilent 5975 GC-MS 联用对烷烃和

芳烃的组分进行测定,烷烃和芳烃的混标购自北京百灵威科技有限公司。将风干后的烷烃和芳烃组分分别用正己烷定容,过 0.22 μm 尼龙膜后分别取 1 mL 溶液进行气质联用测定。烷烃的升温程序为 40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 2 min,以 3 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温到 300 $^{\circ}\text{C}$ 保持 55 min;芳烃的升温程序为 70 $^{\circ}\text{C}$ 保持 1 min,以 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温到 260 $^{\circ}\text{C}$ 保持 4 min,再以 5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温到 300 $^{\circ}\text{C}$ 保持 4 min。

2 结果与分析

2.1 土壤的理化性质

对土壤的 pH、有机质、元素等进行了测定,pH 值为 8.15,其他结果见表 1。

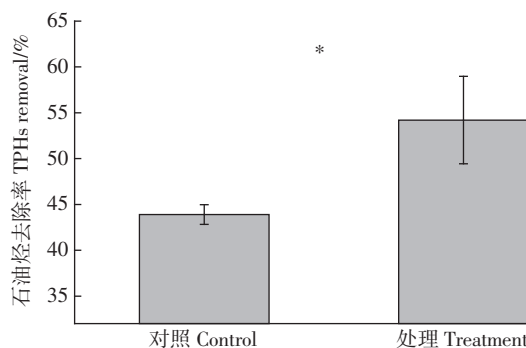
2.2 肥料对石油烃去除率的影响

施肥对苏丹草修复石油污染的效果见图 1。经过 90 d 的修复,在苏丹草的单一作用下,石油烃去除率为 43.89%,而施肥与苏丹草联合修复后石油烃去除率达 54.20%,且与对照有显著差异($P<0.05$)。

2.3 肥料对苏丹草生长发育的影响

本试验对苏丹草的形态学特性及光合色素含量进行了测定,以反映施肥对植物的生长发育的作用。由图 2 可知,施肥促进了植物的株高、根长、干重的增加。对照的株高、根长、地上干重、地下干重分别为 15.09 cm、5.44 cm、0.09 g、0.01 g,施肥处理后这些指标分别提高了 7.98 cm、1.50 cm、0.36 g、0.07 g。经统计分析可知,株高和地下干重达到了极显著差异($P<0.01$),地上干重达到了显著差异($P<0.05$)。

对苏丹草叶片的色素含量进行了分析(图 3),发现对照的叶绿素和类胡萝卜素含量分别为 2.01、0.38 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ FW,施肥处理的叶绿素含量略微减少了 0.03 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ FW,类胡萝卜素含量增加了 0.09 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ FW;同时对叶绿素 a/b 和叶绿素 a/类胡萝卜素进行了比较,发现施肥处理的叶绿素 a/b 和叶绿素 a/类胡萝卜素分别比对照(叶绿素 a/b=6.20、叶绿素 a/类胡萝卜素=4.75)减少了 0.22 和 1.17。对以上 4 项指标进行统计学分析,结果均无显著差异($P>0.05$)。这可能是由于肥料为植物的生长发育提供了必要的营养,使其耐受性得到了提高,促进了植物的生长发育。



* 表示不同处理间差异显著($P<0.05$),** 表示不同处理间差异极显著($P<0.01$)。下同

*Indicates significant differences between treatments($P<0.05$);

**Indicates significant differences between treatments($P<0.01$).

The same below

图 1 石油烃的去除率

Figure 1 Removal rates of petroleum hydrocarbons

2.4 肥料对芳烃组分的影响

采用气质联用方法对 90 d 后土壤中的多环芳烃残留量进行了测定(图 4)。由图 4 可知,含量较高的多环芳烃组分有菲(PHE)、芘(PYR)、苯并[a]蒽(BaA)和蒽(CHR),这几种多环芳烃组分的总量在对照和施肥处理中分别占其总多环芳烃(16 种)含量的 87.33% 和 86.67%,与 Wang 等^[17]报道的主要多环芳烃组分为 3 种(菲、芘和蒽),占总多环芳烃含量 75% 的结果有一定相近之处。并且,含量较低的多环芳烃组分包括萘(NP)、苊(ACY)、二氢苊(ACE)和苯并[k]荧蒽(BkF),它们的总量在对照和施肥处理中均占其总多环芳烃含量的 0.20%。这可能是由于这几种化合物的沸点低、挥发性强,在提取浓缩等过程中有挥发损失所致^[18]。

对 16 种多环芳烃组分的去除率分别进行比较发现:对照中去除率较高的有蒽(29.82%)、苯并[k]荧蒽(40.00%)、苯并[a]芘(27.47%)、茚并[1,2,3-cd]芘(51.19%)、二苯并[a,h]蒽(58.44%)和苯并[g,h,i]芘(58.53%);施肥处理中去除率较高的有萘(23.73%)、二氢苊(27.91%)、菲(20.37%)、蒽(47.15%)、苯并[a]蒽(21.81%)、蒽(22.69%)、苯并[b]荧蒽(30.39%)、苯并[k]荧蒽(37.52%)、苯并[a]芘(39.01%)、茚并[1,2,3-cd]芘(58.51%)、二苯并[a,h]蒽(63.07%)和苯并[g,h,i]芘(60.46%)。对照和施肥处理中总多环芳烃的去除

表 1 土壤样品的理化性质($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 Chemical and physical properties of soil($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

有机质 Organic matter	总氮 Total N	总磷 Total P	总钾 Total K	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn
37.580	1.221	0.711	27.142	26.996	0.015	0.025	21.775	0.430	0.024	0.029	0.090	0.141

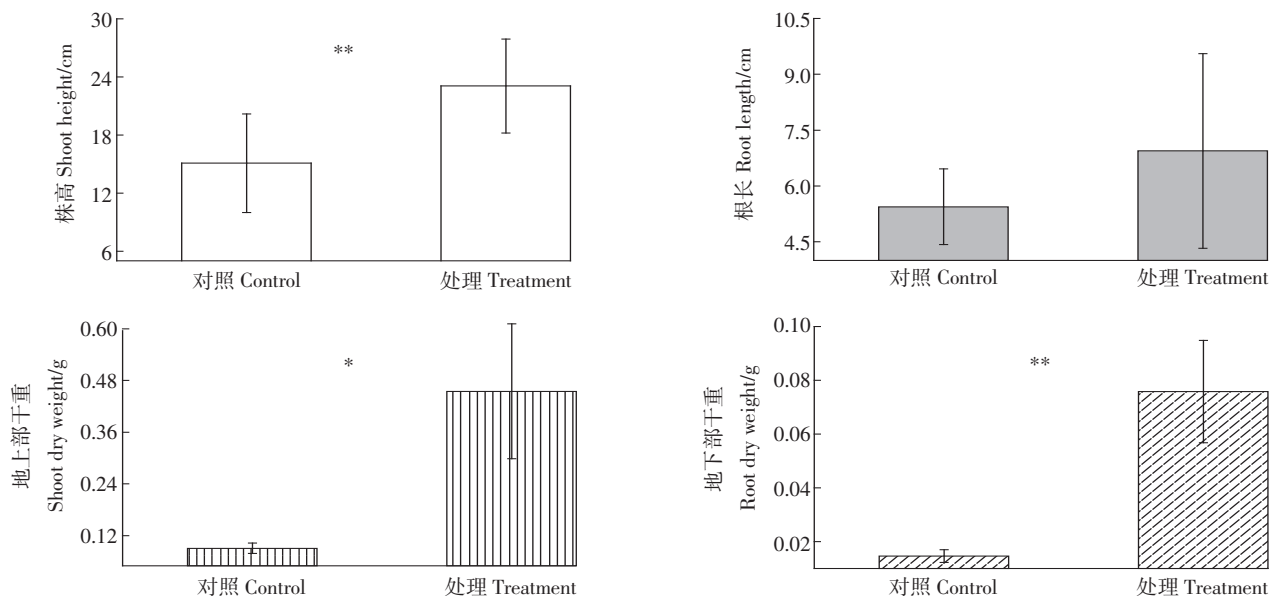


图2 苏丹草的形态学特性

Figure 2 Morphological attributes of Sudangrass

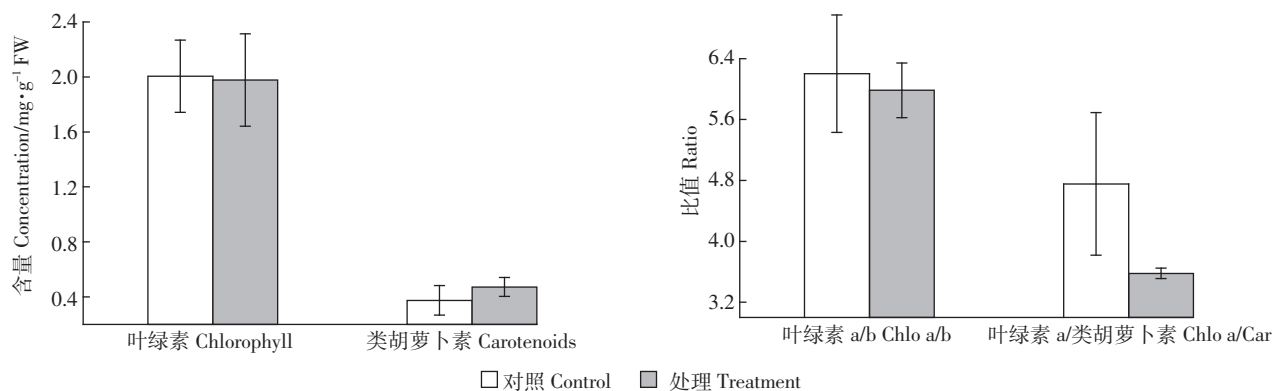
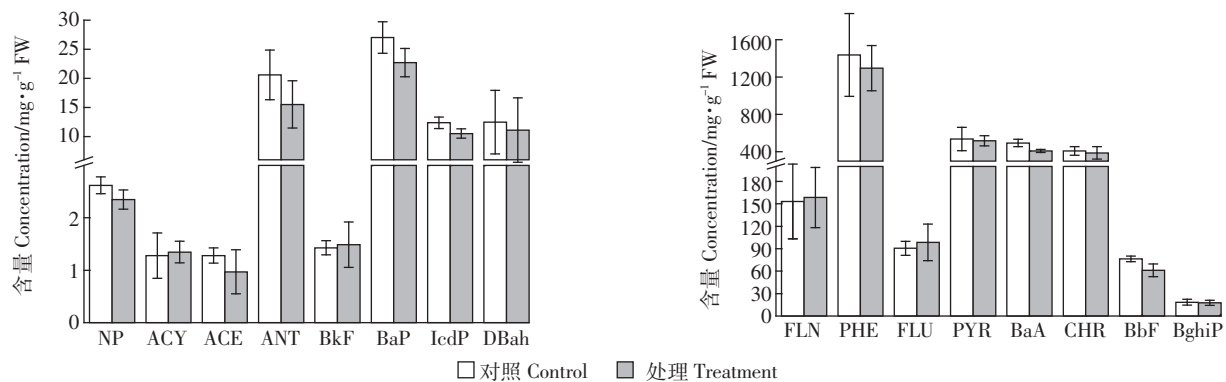


图3 苏丹草的光合色素含量

Figure 3 Content of photosynthetic pigments in Sudangrass



NP: 萘, ACY: 芘, ACE: 二氢芘, FLN: 苧, PHE: 菲, ANT: 蒽, FLU: 荧蒽, PYR: 苝, BaA: 苯并[a]蒽, CHR: 蒾, BbF: 苯并[b]荧蒽, BkF: 苯并[k]荧蒽, BaP: 苯并[a]芘, IcdP: 茚并[1,2,3-cd]芘, DBah: 二苯并[a,h]蒽, BghiP: 苯并[g,h,i]芘

NP: Naphthalene, ACY: Acenaphthylene, ACE: Acenaphthene, FLN: Fluorene, PHE: Phenanthrene, ANT: Anthracene, FLU: Fluoranthene, PYR: Pyrene, BaA: Benz(a) anthracene, CHR: Chrysene, BbF: Benzo(b) fluoranthene, BkF: Benzo(k) fluoranthene, BaP: Benzo(a) pyrene, IcdP: Indeno(1,2,3-cd) pyrene, DBah: Dibenzo(ah) anthracene, BghiP: Benzo(ghi) perylene

图4 不同处理修复后土壤中芳烃的残留量

Figure 4 Residual content of aromatic hydrocarbons in soil with different treatments after remediation

率分别为 13.96%和 21.35%,在统计学上无显著性差异($P>0.05$)。

2.5 肥料对烷烃组分的影响

采用气质联用对 90 d 后土壤中的烷烃残留量进行了测定(表 2)。由表 2 可知,含量较高的烷烃组分是从 C14~C40,与 Wang 等^[17]测定的较高含量的烷烃是从 C13~C37 的结果相近,而本试验中测得的 C38、

C39 和 C40 含量也较高,可能与原油中组分含量有一定差异有关。

对 33 种烷烃组分进行了比较,对照与施肥处理相比,烷烃组分残留量的差异性表现为:在 C8、C10 和 C12 中均有极显著性差异,在 C9、C11 和 C21~C24 中均有显著性差异,在其他组分中无显著差异。此外,对照中去除率达到 30%以上的组分范围从 C25~C40,

表 2 不同处理修复后土壤中烷烃的残留量

Table 2 Residual content of alkanes in soil with different treatments after remediation

烷烃组分 Alkane components	出峰时间 Peak time/ min	含量 Concentration/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		差异性 Difference
		对照 Control	处理 Treatment	
C8	10.609	78.33±4.41	62.94±3.46	**
C9	15.198	18.56±3.13	11.20±0.51	*
C10	20.325	11.42±1.17	7.32±0.86	**
C11	25.507	38.69±8.29	24.38±1.66	*
C12	30.496	27.30±1.87	18.60±1.93	**
C13	35.237	42.15±5.82	34.12±6.78	—
C14	39.702	265.79±172.59	386.77±86.53	—
C15	43.92	691.39±298.74	702.63±73.12	—
C16	47.903	1 801.85±692.97	1 458.83±311.03	—
C17	51.679	2 430.30±567.93	1 969.54±144.07	—
C18	55.276	2 623.36±634.93	2 050.93±337.70	—
C19	58.694	3 039.99±401.37	2 445.31±130.66	—
C20	61.946	4 928.82±601.00	3 870.80±271.35	—
C21	65.061	5 707.21±556.95	4 465.87±246.10	*
C22	68.038	6 941.74±796.30	5 260.02±275.13	*
C23	70.891	7 174.42±574.00	5 496.03±294.57	*
C24	73.633	7 086.95±518.10	5 815.10±326.91	*
C25	76.266	7 180.25±502.62	6 222.13±343.61	—
C26	78.802	7 524.06±598.81	6 822.79±384.90	—
C27	81.255	6 105.79±362.24	5 622.82±316.48	—
C28	83.611	4 359.68±158.48	4 193.17±249.12	—
C29	85.885	4 251.57±159.70	4 296.66±377.73	—
C30	88.077	6 103.65±778.12	5 945.19±303.35	—
C31	90.296	5 377.57±214.40	5 131.98±477.91	—
C32	92.804	3 946.05±144.49	3 769.76±398.80	—
C33	95.712	3 963.96±183.08	3 802.46±382.89	—
C34	99.157	3 011.51±305.03	2 921.20±397.55	—
C35	103.278	3 546.59±182.82	3 349.01±423.81	—
C36	108.226	2 461.26±323.70	2 234.60±401.14	—
C37	114.235	3 997.11±489.72	3 782.65±584.90	—
C38	121.539	2 602.35±209.33	2 477.52±244.85	—
C39	130.442	2 238.42±275.57	1 941.45±978.71	—
C40	141.316	2 211.27±489.50	1 984.08±509.16	—
Sum	—	111 789.30±5 135.61	98 577.86±5 730.85	*

注:* 表示不同处理间差异显著($P<0.05$);** 表示不同处理间差异极显著($P<0.01$);—表示差异不显著。

Note:* indicates significant differences between treatments($P<0.05$); ** indicates significant differences between treatments($P<0.01$); — indicates no significant differences between treatments($P>0.05$).

其中C34、C36~C40的去除率达到了60%以上,最高为78.22%(C40);施肥处理中去除率达到30%以上的组分范围从C17~C40,其中C34、C36~C40的去除率达到了60%以上,最高为80.46%(C40)。对照和施肥处理中烷烃(C8~C40)的去除率分别为45.50%和51.94%,在统计学上有显著性差异($P < 0.05$)。

3 讨论

植物的生物量受其生长环境的影响,气候(温度、光照、水分)、栽培、管理措施等条件均能影响植物的生物量^[19]。施肥是增加植物株高和生物量的措施之一^[20-21],本试验中苏丹草的株高、地上干重和地下干重均得到了显著增加,可能是肥料在增加地上部生物量的同时,也促进了地下部生物量的增加,进而使植物能够吸收更多的水分,并且生物量的增加还能减少土壤水分的蒸发^[19]。这说明肥料是植物获得高生物量的重要条件,它能提高植物对水分的利用效益^[22-23],进而使植物能够获得充足的水分,以应对不良环境对其造成的影响,提高植物的耐受性。

同时,养分的添加也能促进石油烃的降解^[24-25],Basumatary等^[26]通过向土壤中添加氮磷钾复合肥(N:120 mg·kg⁻¹;P:60 mg·kg⁻¹;K:60 mg·kg⁻¹),经过360 d,石油烃降解率达到61.2%~86.2%。Coulon等^[27]通过添加肥料,330 d后重油和柴油的石油烃平均降解率均超过80%。张强等^[28]使用土壤质量0.75%的硝酸铵与磷酸二氢铵的复合肥料(5:1),经过60 d的修复,石油烃去除率达到了48.5%。齐建超等^[29]将诺沃肥等有机肥加入土壤中,刺激微生物的生长,64 d后石油烃去除率也达43.91%。这均表明,施肥能够促进土壤中石油烃的去除。本试验中施肥也显著提高了污染土壤中石油烃的去除率,可能是肥料为植物和土壤微生物生长发育提供了充足的养分,促进了植物根际和土壤微生物的生长发育,进而改善了土壤环境,改变了土壤中的微生物结构组成。

肥料能促进石油中烷烃和芳烃组分的去除。在本试验的对照和处理中,菲的去除率分别为11.67%和20.37%,烷烃组分(C13~C28)去除率分别为6.32%~52.05%(C13除外)和10.70%~53.88%(C14除外)。吴亮等^[30]添加了硫包衣尿素和甲醛尿素,菲的去除率分别为9.60%和13.49%,从C13~C28的烷烃组分去除率分别为13.94%~59.02%和11.56%~49.65%。在对照和处理中,烷烃(C8~C40)的残留量分别是芳烃(16种多环芳烃)的33.91倍和32.72倍(表2和图4),初始

土壤中的比值达到53.53倍,而Wang等^[17]报道在其所有试验土壤中烷烃是芳烃的33~87倍。这表明烷烃的含量可能决定着石油烃的去除率,且烷烃比芳烃更容易去除。

4 结论

(1)经过90 d的修复,土壤中石油烃含量明显下降,与不加肥料的对照试验相比,氮磷钾肥的配施提高了石油烃的去除率,达到了54.20%,与对照有显著差异。

(2)施肥处理促进了苏丹草的生长发育,其中株高、地上干重和地下干重显著高于对照,其他生长指标无显著差异。

(3)施肥处理促进了多环芳烃(16种)和烷烃(C8~C40)的去除,对烷烃的去除效果优于芳烃。

参考文献:

- [1] Pi Y, Xu N, Bao M, et al. Bioremediation of the oil spill polluted marine intertidal zone and its toxicity effect on microalgae[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015, 17(4): 877-885.
- [2] 贾洪柏,曲丽娜,王秋玉. 4株石油降解真菌的生长及降解特性分析[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(7): 1361-1367.
JIA Hong-bai, QU Li-na, WANG Qiu-yu. Growth characteristics and degradation properties of four oil-degradation fungi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7): 1361-1367.
- [3] 于齐,张晓曦,刘增文,等. 陕北石油区城市绿化树木枯落叶对油污土壤的修复效应[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(1): 50-57.
YU Qi, ZHANG Xiao-xi, LIU Zeng-wen, et al. Remediation effects of urban greening-tree litters on petroleum-contaminated soil in oil producing region of Northern Shaanxi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 50-57.
- [4] 谯兴国,李法云,张营,等. 冻融作用对石油污染土壤酶活性和水溶性碳的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3): 914-919.
QIAO Xing-guo, LI Fa-yun, ZHANG ying, et al. The effect of freezing and thawing on enzyme activity and dissolved organic carbon in petroleum contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 914-919.
- [5] 鲍艳宇,周启星,鲍艳娇,等. 3种四环素类抗生素在石油污染土壤上的吸附解吸[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(7): 1257-1262.
BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, BAO Yan-jiao, et al. Adsorption and desorption of three tetracycline antibiotics in petroleum-contaminated soils[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7): 1257-1262.
- [6] Gaskin S E, Bentham R H. Rhizoremediation of hydrocarbon contaminated soil using Australian native grasses[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(17): 3683-3688.
- [7] Cai Z, Zhou Q, Peng S, et al. Promoted biodegradation and microbiological effects of petroleum hydrocarbons by *Impatiens balsamina* L. with strong endurance[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 183(1):

- 731-737.
- [8] Oleszczuk P, Hale S E, Lehmann J, et al. Activated carbon and biochar amendments decrease pore-water concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 111: 84-91.
- [9] Zhu F, Yan W, Tian D, et al. Impact of cultivating *Cinnamomum camphora*(L.) Presl. on PAHs dissipation in diesel-contaminated soils[C]. Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), 2011 International Conference on. IEEE, 2011: 7634-7636.
- [10] Das R, Tiwary B N. Production of indole acetic acid by a novel bacterial strain of *Planomicrobium chinense* isolated from diesel oil contaminated site and its impact on the growth of *Vigna radiata*[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 62: 92-100.
- [11] 赵硕伟, 沈嘉澍, 沈 标. 复合菌群的构建及其对石油污染土壤修复的研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1567-1572.
- ZHAO Shuo-wei, SHEN Jia-shu, SHEN Biao. Construction of multiple bacterial consortium and its application in bioremediation of petroleum-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1567-1572.
- [12] Wang Z Y, Xu Y, Zhao J, et al. Remediation of petroleum contaminated soils through composting and rhizosphere degradation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190(1): 677-685.
- [13] 谢 勇, 孙洪仁, 张新全, 等. 坝上地区紫花苜蓿氮、磷、钾肥料效应与推荐施肥量[J]. 中国草地学报, 2012, 34(2): 52-57.
- XIE Yong, SUN Hong-ren, ZHANG Xin-quan, et al. Effects of N, P and K fertilizer on alfalfa and recommended fertilizer rate in Bashang area[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(2): 52-57.
- [14] 李小坤, 鲁剑巍. 施肥对苏丹草产草量和氮磷钾养分吸收的影响[J]. 草地学报, 2006, 14(1): 52-56.
- LI Xiao-kun, LU Jian-wei. Effect of fertilization to the yield and NPK nutrient absorption of Sudangrass[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(1): 52-56.
- [15] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. *Plant Physiology*, 1949, 24(1): 1-15.
- [16] 朱光廉. 植物生理学试验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
- ZHU Guang-lian. Physiology of plant experiment[M]. Beijing: Peking University Press, 1990.
- [17] Wang X, Cai Z, Zhou Q X, et al. Bioelectrochemical stimulation of petroleum hydrocarbon degradation in saline soil using U-tube microbial fuel cells[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2012, 109(2): 426-433.
- [18] Wencławiak B, Rathmann C, Teuber A. Supercritical-fluid extraction of soil samples and determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by HPLC[J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1992, 344(10): 497-500.
- [19] 李文西. 苏丹草-黑麦草轮作制中连续施肥对饲草生长与土壤肥力的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- LI Wen-xi. Effect of continuous fertilization on forage growth and soil fertility in the Sudangrass and ryegrass rotation system[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [20] 黄勤楼, 陈 恩, 黄秀声, 等. 不同氮肥水平下墨西哥玉米的 SPAD 值与部分农艺性状和品质关系研究[J]. 福建农业学报, 2008, 23(1): 58-62.
- HUANG Qin-lou, CHEN En, HUANG Xiu-sheng, et al. Relationship among SPAD, partial traits and quality of *Euchlaena Mexicana* at different nitrogen application rates[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 23(1): 58-62.
- [21] 文石林, 董春华, 荣湘民. 磷肥和石灰对红壤墨西哥玉米生长的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(6): 870-874.
- WEN Shi-lin, DONG Chun-hua, RONG Xiang-min. The effects of phosphate and lime application on growth of *Zea Mexicana* in red soils[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(6): 870-874.
- [22] Li W, Li Z, Li W. Effect of the niche-fitness at different water supply and fertilization on yield of spring wheat in farmland of semi-arid areas[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(1): 1-13.
- [23] Pala M, Ryan J, Zhang H, et al. Water-use efficiency of wheat-based rotation systems in a Mediterranean environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 93(3): 136-144.
- [24] Bao M, Sun P, Yang X, et al. Biodegradation of marine surface floating crude oil in a large-scale field simulated experiment[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, 16(8): 1948-1956.
- [25] Jasmine J, Mukherji S. Evaluation of bioaugmentation and biostimulation effects on the treatment of refinery oily sludge using 2n full factorial design[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, 16(8): 1889-1896.
- [26] Basumatary B, Bordoloi S, Sarma H P. Crude oil-contaminated soil phytoremediation by using *Cyperus brevifolius* (Rottb.) Hassk[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(6): 3373-3383.
- [27] Coulon F, Pelletier E, Gourhant L, et al. Degradation of petroleum hydrocarbons in two sub-antarctic soils: Influence of an oleophilic fertilizer[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, 23(8): 1893-1901.
- [28] 张 强, 邱维忠, 迟建国, 等. 石油污染土壤修复过程中肥料的应用[J]. 山东科学, 2009, 22(5): 127-130.
- ZHANG Qiang, QIU Wei-zhong, CHI Jian-guo, et al. Application of fertilizers in remediation of petroleum contaminated soil[J]. *Shandong Science*, 2009, 22(5): 127-130.
- [29] 齐建超, 张承东, 乔 俊, 等. 微生物与有机肥混合剂修复石油污染土壤的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 66-72.
- QI Jian-chao, ZHANG Cheng-dong, QIAO Jun, et al. Bioremediation of petroleum-contaminated soil by mixed microbes and organic fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1): 66-72.
- [30] 吴 亮, 梁生康, 王修林, 等. 两种缓释肥料在海水中的养分释放特性及强化石油烃生物降解[J]. 环境化学, 2010, 29(3): 455-461.
- WU Liang, LIANG Sheng-kang, WANG Xiu-lin, et al. Study on nutrient release characteristics of two slow-release fertilizers in sea water and their abilities to enhance biodegradation of petroleum hydrocarbons[J]. *Environmental Chemistry*, 2010, 29(3): 455-461.